



UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

Departamento de Obras Civiles

Clasificación Morfodinámica de Desembocadura de Ríos Chilenos en base al Diagrama de Galloway

Memoria de Título presentada por

Nicole Alexandra Montecinos Horta

Como requisito parcial para optar al título de la carrera de

Ingeniería Civil

Profesor Guía
Raúl Flores Audibert

Octubre de 2025



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☒ Memoria o trabajo de título ☐ Tesis de Postgrado

Título del trabajo: Clasificación Morfodinámica de Desembocadura de Ríos Chilenos en base al Diagrama de Galloway

Nombre del candidato(a): Nicole Alexandra Montecinos Horta

Carrera / Grado: Ingeniería Civil

Campus: San Joaquín **Departamento:** Obras Civiles

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Raúl Flores Audibert, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente

DEJO CONSTANCIA que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

☒ El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por (**marcar una opción**):

☐ 6 meses ☐ 12 meses ☐ 2 años ☐ 3 años ☐ 5 años ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 10/11/2025 Firma: _____

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 10/11/2025 Firma: _____

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.



UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

TITULO DE LA TESIS:

**CLASIFICACIÓN MOFODINÁMICA DE DESEMBOCADURA DE RÍOS
CHILENOS EN BASE AL DIAGRAMA DE GALLOWAY**

AUTOR:

NICOLE ALEXANDRA MONTECINOS HORTA

TRABAJO DE MEMORIA, presentado como requisito parcial para optar al título de la carrera de INGENIERIA CIVIL de la Universidad Técnica Federico Santa María.

Nombre Prof. Guía

Raúl Flores A.

Nombre Miembro 1 Comisión

Nombre Miembro 2 Comisión

Karina Soto R.

San Joaquín, Chile, Octubre de 2025

índice

1.	Contextualización.....	4
2.	Marco Teórico.....	5
2.1	Antecedentes de la investigación.....	5
2.2	Conceptos teóricos.....	5
I.	Tipos de Desembocaduras.....	5
II.	Tipos de Clasificación.....	6
2.3	Zona de Estudio.....	11
3.	Definición y búsqueda de Solución al Problema.....	12
3.1	Definición.....	12
3.2	Búsqueda de Solución al Problema.....	12
4.	Objetivos.....	12
4.1	Objetivo General.....	12
4.2	Objetivos Específicos.....	12
5.	Metodología de investigación.....	12
5.1	Metodología de Predicción de morfología.....	13
5.2	Metodología de observación de morfología.....	13
6.	Identificación de desembocaduras.....	13
6.1	Zona Norte de Chile.....	13
6.2	Zona Centro de Chile.....	14
6.3	Zona Sur y Austral de Chile.....	14
7.	Predicción de Morfología de las desembocaduras.....	15
8.	Medición de la morfología de las desembocaduras.....	16
9.	Resultados.....	16
9.1	Análisis de datos.....	16
9.2	Predicción de Morfología del Delta.....	17
I.	Resultados Zona Norte de Chile – Predicción.....	18
II.	Resultados Zona Centro de Chile- Predicción.....	18
III.	Resultados Zona Sur y Austral de Chile- Predicción.....	19
9.3	Predicción Versus Observación de Morfología del Delta.....	21
I.	Resultados Zona Norte de Chile Predicción vs. Observación.....	21
II.	Resultados Zona Centro de Chile Predicción vs. Observación.....	22
III.	Resultados Zona Sur y Austral de Chile Predicción vs. Observación.....	23
10.	Conclusiones y Comentarios.....	25
11.	Referencias.....	26

Resumen

Las desembocaduras son sistemas que cumplen un rol fundamental en el aporte de aguas continentales y sedimentos dirigidos hacia el océano (Stuardo & Claudio Valdovinos, 1989). Debido a su importancia, estos ambientes naturales han sido clasificados morfológicamente en función de métodos y criterios muy variados (Correa Arango et al., 2002). Uno de los estudios fundamentales es el Diagrama Ternario de Galloway, el cual establece que la morfología depende del proceso dominante entre marea, oleaje y río (Galloway, 1975). Este modelo ha sido utilizado como base para el desarrollo de nuevos estudios orientados a mejorar las formas de clasificación de los deltas. Sin embargo, actualmente se reconoce que estos enfoques comparten un factor en común asociado a métodos mal descritos e incertidumbres en la predicción de resultados (Paniagua-Arroyave & Nienhuis, 2022). Estos problemas derivan de la naturaleza cualitativa de la información utilizada, lo cual conduce a resultados subjetivos (Lisbet et al., 2023). En este contexto, resulta evidente la necesidad de realizar métodos cuantitativos más robustos que permitan estandarizar la clasificación morfológica de las desembocaduras.

Estudios recientes han buscado cuantificar los parámetros definidos en el Diagrama Ternario de Galloway, confirmando la hipótesis de que la morfología de una desembocadura se determina mediante el equilibrio entre la influencia fluvial y marina. Sin embargo, estos trabajos no han logrado desarrollar una clasificación completa, debido a la falta de cuantificación de parámetros fundamentales en la descripción de las desembocaduras (Broadus et al., 2022). Ante esta limitación, Paniagua-Arroyave & Nienhuis (2024) proponen un método que permite cuantificar las fuentes de incertidumbre en los procesos de clasificación, obteniendo resultados mediante predicción y observación ambos con base cuantitativa. Este modelo será implementado en la presente memoria con el objetivo de realizar una clasificación morfodinámica de las principales desembocaduras ubicadas en las costas de Chile.

Palabras claves: Desembocaduras, Sedimentos, Galloway, Clasificación, Morfológica, Cualitativo, Cuantitativo, Predicción, Observación.

1. Contextualización

Estudios recientes han permitido la predicción de la influencia del oleaje, ríos y mareas en los deltas a nivel mundial, pero estos métodos tienen asociados incertidumbres que siguen siendo poco conocidas (Paniagua-Arroyave & Nienhuis, 2024), es por este motivo que la búsqueda de nuevos métodos se centra en la necesidad de comprender la complejidad de cada desembocadura y sus cambios a través del tiempo dado que son ambientes naturales presentes en las costas de todo el mundo (McSweeney et al., 2017), además de ser considerados ambientes privilegiados en los cuales se concentran asentamientos humanos, actividades económicas e incluso se han confirmado como sitios con yacimiento petrolíferos (Correa Arango et al., 2002). Otro aspecto relevante de los sistemas costeros es la influencia de las desembocaduras en el transporte de sedimentos desde el continente hacia los océanos (Torres-Bejarano et al., 2022), estimando que los ríos son capaces de aportar el 95% del total de los sedimentos que llegan a estas áreas (Walling & Fang, 2003).

En el caso de Chile, el estudio de las Desembocaduras es fundamental dado que las costas del país enfrentan al océano mas grande de la Tierra, teniendo la influencia de esta gran masa oceánica prácticamente en todo el territorio, abarcando una longitud de 4270 km (Morales Gamboa et al., 2019). Otro aspecto a considerar y que convierte al país en un lugar de análisis ideal para la aplicación del método cuantitativo de Paniagua-Arroyave & Nienhuis es su geomorfología compleja y extraordinariamente dinámica generando un régimen hídrico desértico desde el norte del país hasta una hiperhumedad en el extremo sur (F. Santibáñez et al., 2016).

Dado el desarrollo que se genera en torno a estos ambientes naturales y la complejidad de una desembocadura producto de los factores que influyen en su cambio morfológico, considerando que cada ambiente natural puede catalogarse como sistemas únicos, es evidente la necesidad de estudios cuantitativos más robustos para estandarizar su clasificación.

2. Marco Teórico

2.1 Antecedentes de la investigación

Considerando la complejidad de las desembocaduras y su rol fundamental en el equilibrio ecosistémico y el desarrollo económico del sector costero, muchos investigadores han propuesto modelos para llevar a cabo su clasificación. Inicialmente, destaca la teoría desarrollada por William E. Galloway quien realizó un diagrama ternario clasificando a los deltas en tres grupos conformados por los deltas pluviales, deltas dominados por olas y los deltas dominados por mareas (Galloway, 1975), mediante la observación de las características morfológicas de las desembocaduras, obteniendo resultados subjetivos. Estudios más recientes han intentado cuantificar los parámetros establecidos en el diagrama de Galloway confirmando la hipótesis de que la morfología de un río se determina mediante el equilibrio entre la influencia fluvial y marina (Broaddus et al., 2022) obteniendo como resultado la comprobación de que características como el tamaño medio de grano y la cohesión de los sedimentos fluviales poseen influencia en la morfología del estuario (Caldwell & Edmonds, 2014). Estos resultados significan una gran contribución para su incorporación cuantitativa en el análisis, pero no serían capaces de generar por completo una clasificación dado que aún no se han cuantificado aspectos tan importantes como la estacionalidad de los flujos, el impacto de la vegetación y hielo en los ríos (Broaddus et al., 2022). Con el avance de los años esta brecha ha disminuido y diferentes investigadores han indagado en la posibilidad de cuantificar datos con el objetivo de disminuir incertidumbres en los resultados obtenidos y poder predecir futuros cambios morfológicos en las costas (Paniagua-Arroyave & Nienhuis, 2022).

Las nuevas formas de clasificación si bien buscan la cuantificación de los datos, de igual forma poseen su sustento teórico en las clasificaciones cualitativas y tiene como base conceptos tales como la caracterización de la morfología de los deltas fluviales determinada por sus redes de canales, costas y geometrías de forma plana, además de la utilización del diagrama de Galloway (Galloway, 1975). En base a esto la investigación y resultados de esta memoria se centrarán en la utilización del Método Cuantitativo del Diagrama de Galloway planteado por Paniagua-Arroyave & Nienhuis quienes tienen por objetivo minimizar la incertidumbre de los resultados mediante la cuantificación de las variables utilizadas para la clasificación de las desembocaduras, método que aún se encuentra en desarrollo y revisión para confirmar su aplicabilidad en diferentes costas del mundo.

Debido a la complejidad y dinamismo de estos sistemas, se ha intentado agrupar las desembocaduras en función de las similitudes en sus características morfológicas. Estas agrupaciones han permitido que los modelos actuales desarrollen clasificaciones de tipo cualitativo, las cuales resultan relevantes, ya que contribuyen una base de apoyo para el modelo cuantitativo que se implementará.

2.2 Conceptos teóricos

I. Tipos de Desembocaduras

Las desembocaduras son sistemas formados en base a la fuerza dominante de las olas, mareas y río, mismos procesos de dominancia que permiten realizar su clasificación morfológica mediante el método de Galloway (1975) (Lisbet et al., 2023). Estas desembocaduras pueden ser subdivididas en dos grandes grupos conformados por los Estuarios y Deltas.

Si bien los deltas y los estuarios están ambos sometidos a las influencias fluviales y marinas al mismo tiempo (Correa Arango et al., 2002), cada una de estas desembocaduras responden de forma diferente a dichas influencias. En los Estuarios la mezcla de agua dulce de río con el agua salada ocurre en la parte final y más ancha del río y no sobre el área marina determinando una mayor influencia marina que fluvial, mientras que, para el caso de un delta, las influencias fluviales predominan sobre las marinas lo que provoca que la mezcla de agua dulce de río con el agua salada del mar ocurra en el área marina, fuera del área de la desembocadura. (Correa Arango et al., 2002).

II. Tipos de Clasificación

Respecto a los métodos utilizados en la clasificación de la morfología de las desembocaduras, estos se pueden dividir en dos grandes grupos, conformados por métodos cualitativos y métodos cuantitativos.

1. Método cualitativo mediante Diagrama Ternario de Galloway

La clasificación cualitativa de desembocaduras se realiza utilizando el Diagrama Ternario de Galloway, el cual se divide en tres grupos que permiten establecer la morfología dependiendo del proceso dominante entre marea, olas y río (Galloway, 1975), como se muestra en la Imagen 1.

La característica que permiten identificar las desembocaduras dominadas por los ríos es la morfología que adquieren considerando la formación de múltiples canales de distribución del agua (Coleman & Wright, 1975), mientras que los ambientes naturales dominados por las olas tienden a redistribuir los sedimentos en las desembocaduras generando que las costas se aplanen e incluso en algunos casos provocando que las desembocaduras sean selladas evitando la circulación de agua (Nienhuis et al., 2015). Por último, es posible identificar desembocaduras que son dominadas por las mareas las cuales se diferencian por su forma de embudo disminuyendo a medida que se aleja de la costa (Dalrymple et al., 1992).

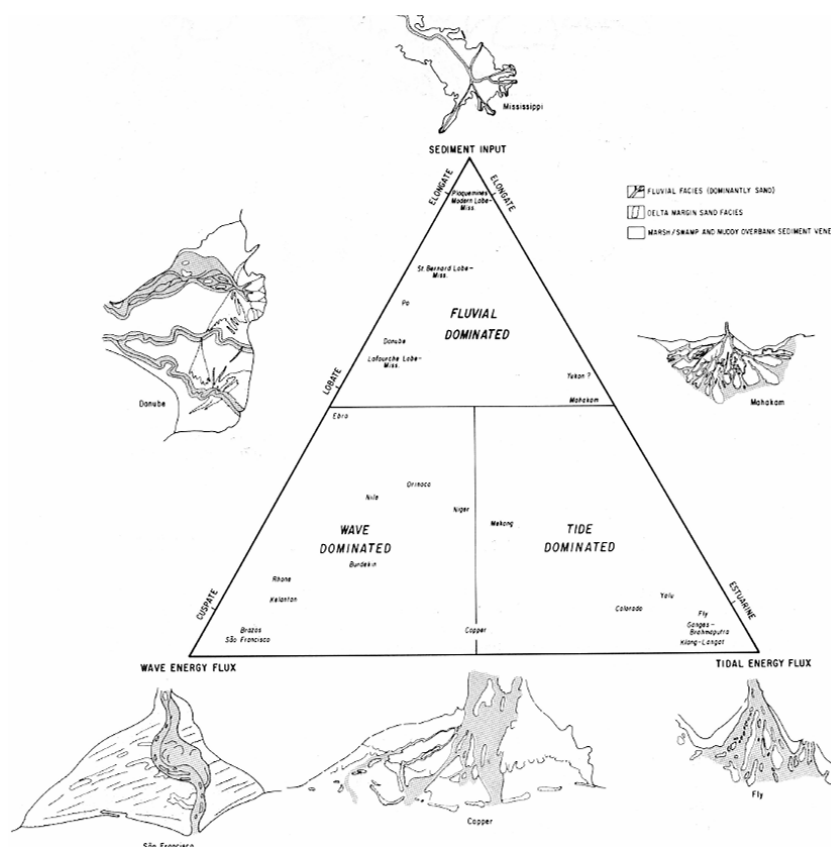


Imagen 1. Diagrama de Galloway considerando tres factores hidrodinámicos.

Fuente: Willian E. Galloway et al. (1975).

El modelo cuantitativo en base al Diagrama Ternario de Galloway utilizado en esta investigación corresponde al trabajo desarrollado por Paniagua-Arroyave y Nienhuis el año 2024 que tiene como objetivo principal disminuir la incertidumbre de datos que al no ser cuantificados generan resultados subjetivos en cuanto a la clasificación morfodinámica de las desembocaduras. Este modelo utiliza una nueva versión del diagrama de Galloway (1975), en el cual se consideran los flujos de sedimentos que son aportados por el río, oleaje y las mareas, cada uno asociado a los ejes del diagrama ternario original de Galloway (Lisbet et al., 2023).

Para obtener la clasificación morfodinámica de las desembocaduras Paniagua-Aroyave y Nienhuis realizan el diagrama mostrado en la Imagen 2 donde se describen los dos grandes procesos de clasificación compuesto por predicciones morfológicas y observaciones de morfología. Ambos procesos poseen procedimientos diferentes pero sus resultados son comparables ya que las variables obtenidas son las mismas y además cuantifican características de las desembocaduras que permiten realizar una clasificación más objetiva basada en resultados cuantitativos.

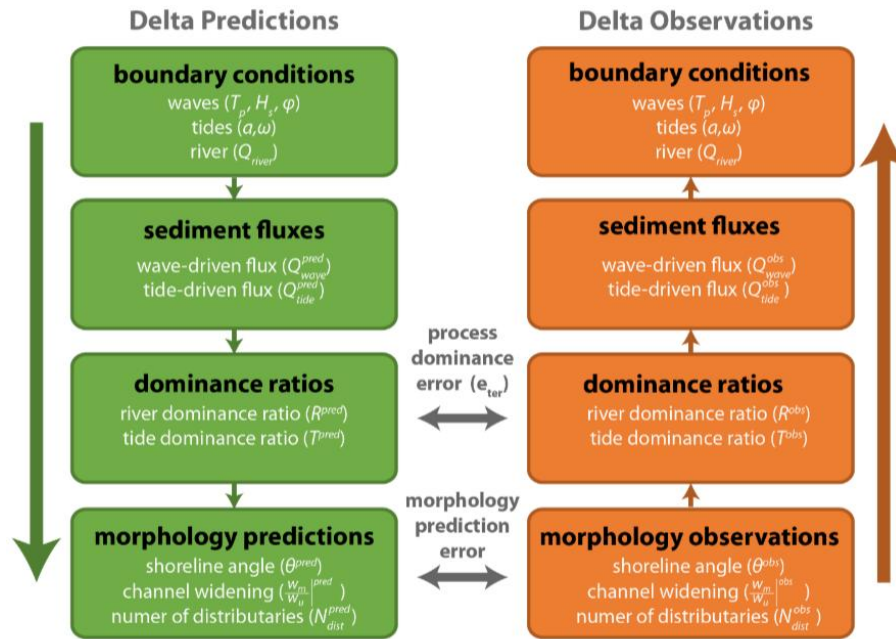


Imagen 2. Diagrama descriptivo para método de predicciones morfológicas y observaciones de morfología.

Fuente. Paniagua-Aroyave y Nienhuis 2024.

Como se observa en la Imagen 2, conociendo las condiciones de borde es posible predecir los flujos de sedimentos. En primer lugar, se puede mencionar el máximo flujo de sedimentos producido por el oleaje Q_{wave}^{pred} (Ecuación 1), valor que está en función del transporte de sedimentos neto observado a lo largo de la costa $Q_{w,net}$. El desarrollo y cálculo de estos valores está asociado a operaciones matemáticas más extensas desarrolladas de forma detallada en la investigación desarrollada por Paniagua-Aroyave y Nienhuis en 2024 y plasmada en los códigos de Matlab que permiten la obtención de los resultados.

$$Q_{wave}^{pred} = \max[Q_{w,net}(\theta)]_{-\pi \leq \theta \leq 0} - \min[Q_{w,net}(\theta)]_{-\pi \leq \theta \leq 0} \quad \text{Ecuación 1}$$

Luego, es posible predecir la amplitud del flujo de sedimentos producido por la marea Q_{Tide}^{pred} mediante la Ecuación 2 (Nienhuis et al., 2018):

$$Q_{Tide}^{pred} = \frac{1}{2} \omega k_{tide} \alpha^2 L^2 \beta f c \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde:

- ω : Frecuencia angular de la marea (rad/s)
- $k_{tide} = \frac{\omega}{\sqrt{\theta D_{50} R C_z \pi}} (m^{-1})$, Coeficiente de transporte de sedimentos
- θ : Numero de Shields en condiciones activas (0.2)
- D_{50} : Tamaño medio del grano (0.1 mm)
- R : Gravedad específica sumergida (1.65)
- C_z : Rugosidad de Chezy ($55 m^{1/2} s^{-1}$)

- α : Amplitud de la marea en alta mar (m)
- $L = \frac{du}{S}$, Longitud del estuario
- $\beta = \frac{w_u}{du}$,
- $f = 1 + \frac{2S}{ka}$, Con S como la pendiente media del canal del delta
- c: Concentración de sedimentos (kg m^{-3})

Estos flujos de sedimentos son utilizados para realizar el cálculo de los flujos relativos de sedimentos con las siguientes ecuaciones definidas por Nienhuis(et al.,2020).

$$r_{river} = \frac{Q_{river}}{Q_{river} + Q_{wave} + Q_{tide}} \quad \text{Ecuación 3}$$

$$r_{wave} = \frac{Q_{wave}}{Q_{river} + Q_{wave} + Q_{tide}} \quad \text{Ecuación 4}$$

$$r_{tide} = \frac{Q_{tide}}{Q_{river} + Q_{wave} + Q_{tide}} \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde:

- r_{river} : Flujo relativo de sedimentos aportados por el río.
- r_{wave} : Flujo relativo de sedimentos aportados por el oleaje.
- r_{tide} : Flujo relativo de sedimentos aportados por la marea.

En estas expresiones es posible observar que los flujos calculados para cada proceso se obtienen de dividir el flujo de sedimentos de interés en la suma de todos los flujos presentes en el análisis, además se debe cumplir que $r_{tide} + r_{wave} + r_{river} = 1$.

Una vez obtenidos los flujos de sedimentos y los flujos relativos se establecen las proporciones de dominancia de las mareas R y T (Nienhuis et al., 2015, 2018):

$$R = \frac{Q_{river}}{Q_{wave}} \quad \text{Ecuación 6}$$

$$T = \frac{Q_{tide}}{Q_{river}} \quad \text{Ecuación 7}$$

El valor de R correspondiente a la razón de dominancia del río sobre el oleaje y permite predecir el tipo de morfología esperada en la desembocadura, interpretando valores bajos de R como una línea de costa recta por la predominancia del oleaje y para valores $R > 1$ se espera una desembocadura con múltiples distributarios debido a la predominancia del río (Felipe Paniagua-Arroyave & Nienhuis, 2024).

Para la relación unidimensional T que determina la razón de dominancia de la marea sobre el río, se tiene que para valores de $T > 1$ la desembocadura presentara un ensanchamiento aguas abajo producto de la predominancia de la marea sobre el río, mientras que valores de $T < 1$ significarían un pequeño cambio en el ancho de la desembocadura del río generado por la marea (Felipe Paniagua-Arroyave & Nienhuis, 2024).

Las razones de dominancia R y T son utilizadas para predecir tres características morfológicas de un delta, en primer lugar, se encuentra el ángulo de costa θ^{pred} que es relacionado con la razón de dominancia R. Para $R < 1$ todo el sedimento que proviene desde el río es depositado a lo largo de ambos flancos del delta y el ángulo de costa (en °) se obtiene mediante la Ecuación 8, mientras que para $R > 1$ la ecuación queda indefinida.

$$\theta^{pred} = Q_{w,net}^{-1} \left(\pm \frac{1}{2} Q_{river} \right) \quad R < 1 \quad \text{Ecuación 8}$$

La segunda predicción morfológica corresponde al número de canales distribuidos en la desembocadura del delta, expresión obtenida de contribuciones generadas con anterioridad por otros investigadores (Broaddus et al., 2022) donde el número de canales se relaciona con el grado de dominancia del río para $R > 1$, calculado con la Ecuación 9.

$$N_{dist}^{pred} = \left\lceil \frac{Q_{river}}{Q_{wave}} \right\rceil \quad \text{Ecuación 9}$$

La tercera predicción morfológica es la ampliación del canal aguas abajo que se calcula con la Ecuación 10.

$$\frac{w_m}{w_u} \Big|^{pred} = \frac{Q_{tide}}{Q_{river} U_f} + 1 \quad \text{Ecuación 10}$$

Donde $U = \frac{0.5w\alpha}{S \cdot u_{river}}$ es la fuerza del flujo de marea relacionado con el flujo fluvial u_{river} . Su resultado se interpreta según la fuerza dominante obteniendo una relación $W_m \gg W_u$ para una fuerza dominante de marea sobre la fuerza del río y una relación $W_m \approx W_u$ para una influencia de marea despreciable.

El segundo proceso corresponde a las observaciones de la morfología que finalmente serán comparadas con los resultados obtenidos de las predicciones morfológicas. La digitalización de las dimensiones del delta se realiza mediante imágenes satelitales de las desembocaduras en estudio, con el objetivo de determinar gráficamente los siguientes parámetros:

- Línea de costa de referencia
- Perfil del delta
- Ancho del canal fluvial
- Flanco izquierdo del Delta
- Flanco derecho del Delta
- Ancho del canal de la(s) desembocadura(s) de la(s) distributaria(s)

Utilizando estas variables, se pueden inferir los flujos de olas, ríos y mareas, mediante la estimación de la razón de dominancia fluvial R^{obs} y la razón de dominancia de mareas T^{obs} (Felipe Paniagua-Arroyave & Nienhuis, 2024):

$$R^{obs} = N_{dist}^{obs}, \quad N_{dist}^{obs} > 1 \quad \text{Ecuación 11}$$

o

$$R^{obs} = \frac{Q_{w,net}^{obs}}{Q_{wave}^{pred}} = \frac{Q_{w,net}(\theta_{right}^{obs}) - Q_{w,net}(\theta_{left}^{obs})}{Q_{wave}^{pred}}, \quad N_{dist}^{obs} = 1 \quad \text{Ecuación 12}$$

Donde:

- N_{dist}^{obs} : Número de canales tributarios de descarga.
- $Q_{w,net}$: Cuantificación del flujo de olas observado en función del ángulo del flanco.
- $\theta_{right or left}^{obs}$: Ángulo del flanco izquierdo o derecho del delta.
- Q_{wave}^{pred} : Amplitud del flujo de sedimentos producido por la marea, ecuación 2.

Para la razón de dominancia de mareas se utiliza el ensanchamiento del canal observado según la siguiente ecuación (Nienhuis et al., 2018):

$$T^{obs} = \left(\frac{w_m}{w_u} \Big|^{obs} - 1 \right) U_f \quad \text{Ecuación 13}$$

Donde:

- $w_m = \frac{\sum_n w_{m,n}}{N_{dist}^{0.5}}$, $w_{m,n}$ Ancho de una sola desembocadura para n distributarios.

- w_u , Ancho del canal fluvial aguas arriba.
- $U = \frac{0.5\omega\alpha}{Su_{river}}$, Fuerza del flujo de marea en relación con el flujo fluvial.
- $f = 1 + \frac{2S}{k\alpha}$, Con S como la pendiente media del canal del delta.

Con la utilización de estas variables es posible obtener la amplitud del flujo de sedimentos producido por la marea y el oleaje mediante el procedimiento de observación (Felipe Paniagua-Arroyave & Nienhuis, 2024):

$$Q_{tide}^{obs} = T^{obs} \cdot Q_{river} \quad \text{Ecuación 14}$$

$$Q_{wave}^{obs} = \frac{Q_{river}}{R^{obs}} \quad \text{Ecuación 15}$$

Finalmente, obtenidos estos valores se pueden calcular los flujos relativos r_x^{obs} que luego serán ubicados en el diagrama ternario de Galloway.

La comparación de resultados de ambos procesos es relacionada mediante la siguiente expresión:

$$e_{ter} = \sqrt{\left[\frac{1}{2}(r_{river}^{pred} - r_{river}^{obs}) + (r_{tide}^{pred} - r_{tide}^{obs})\right]^2 + \frac{3}{4}[(r_{river}^{pred} - r_{river}^{obs})]^2} \quad \text{Ecuación 16}$$

Una incertidumbre e_{ter} con un valor 0 indica una predicción precisa y el valor 1 indica que en ambos procedimientos se obtuvo una dominancia opuesta (Felipe Paniagua-Arroyave & Nienhuis, 2024).

Para poder relacionar estos resultados con el diagrama de Galloway se determina las coordenadas de un punto que representa la posición de cada desembocadura dentro del diagrama, permitiendo observar la influencia relativa de cada uno de los procesos estudiados y cual predomina determinado la morfología de la desembocadura. El resultado esperado de este análisis se observa en la Imagen 3, que corresponde al diagrama obtenido en la investigación realizada por Felipe Paniagua-Arroyave y Nienhuis en 2024.

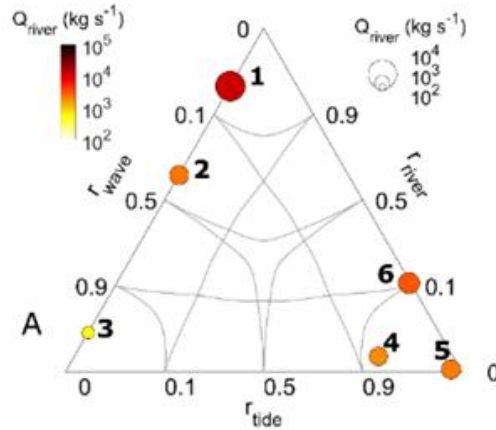


Imagen 3. Diagrama Ternario de Galloway obtenido utilizando Método Cuantitativo.

2.3 Zona de Estudio

Chile se encuentra ubicado en el extremo suroeste de América y se caracteriza por su extensión longitudinal de aproximadamente 4300 km, sin incluir el Territorio Antártico Chileno, y un ancho promedio de 180 km (Santibáñez et al., 2016). Chile Continental posee la característica geográfica de estar limitado al este por la cordillera de los Andes y al oeste por el océano Pacífico enfrentando la influencia de esta gran masa oceánica prácticamente a lo largo de todo el territorio (Morales Gamboa et al., 2019)., como se puede observar en la Imagen 4.

Esta enorme extensión longitudinal permite que el país tenga una gran diversificación de climas, presentando regiones climáticas más áridas en la zona norte del país y regiones climáticas más templadas y frías en la zona centro y sur (Uribe M et al., 2012) , lo que genera variaciones en la temperatura, precipitación y el viento, valores que influyen en la formación de las desembocaduras generando un sistema altamente dinámico (Morales Gamboa et al., 2019).

Entre las Regiones de Atacama y Coquimbo la precipitación que efectivamente llega al mar es muy baja, mientras que en las Regiones centrales correspondientes a Valparaíso y la Región metropolitana se puede constatar que más de un 50% del agua de los ríos llega al mar y desde la región de O'Higgins al sur más del 100% del agua que proviene de la cordillera llega al mar, debido a la capacidad de recibir aportes de afluentes en la parte baja del valle, sumando este caudal al aporte de la cuenca principal en la cordillera (F. Q. Santibáñez et al., 2016).



Imagen 4. Imagen satelital de Territorio Continental Chileno.

3. Definición y búsqueda de Solución al Problema

3.1 Definición

Mediante la consideración de las limitaciones existentes en los métodos cualitativos y la importancia de realizar clasificaciones morfodinámicas acertadas, es posible identificar el problema central en el cual se basa esta investigación que consiste en: “La falta de estudios cuantitativos que permitan estandarizar la clasificación de las desembocaduras en Chile”.

3.2 Búsqueda de Solución al Problema

Debido a la complejidad de los fenómenos naturales que suceden en la costa, es necesario realizar modelos que permitan determinar la importancia de los procesos dominantes, descartar aquellos que tienen una relevancia menor y predecir escenarios futuros ante intervenciones humanas o cambio climático (Morales Gamboa et al., 2019).

La modelación utilizada por la ingeniería oceánica ha sido física y numérica. En primera instancia la modelación física permite representar en menor escala la desembocadura facilitando la observación de procesos costeros, pero con una limitante ya que se dificulta el estudio de procesos que requieren una mayor escala de tiempo (Morales Gamboa et al., 2019), lo que incentiva a ejecutar nuevas investigaciones centradas en una base cuantitativa utilizando la modelación numérica con el objetivo de aportar a la identificación y estandarización de variables claves para la clasificación de desembocaduras eliminando la incertidumbre y entregando resultados más objetivos, lo cual es la finalidad principal de la investigación de Paniagua-Arroyave & Nienhuis .

Es por este motivo que al aplicar un modelo que aun se encuentra en revisión permite contribuir a la validación del método, mediante la determinación de su adaptabilidad en las desembocaduras de las costas de Chile, lo que significa un avance en la búsqueda de la solución al problema de la clasificación morfodinámica de las desembocaduras mediante modelos cuantitativos.

4. Objetivos

4.1 Objetivo General

Clasificar la morfología de las principales desembocaduras en las costas de Chile utilizando el método cuantitativo del Diagrama Ternario de Galloway propuesto por Paniagua-Arroyave & Nienhuis (2024).

4.2 Objetivos Específicos

1. Evaluar la viabilidad de la aplicación del método cuantitativo propuesto por Paniagua-Arroyave & Nienhuis (2024) en las principales desembocaduras existentes en el país.
2. Validar el método cuantitativo mediante el análisis de resultados obtenidos y determinar su adaptabilidad en el contexto del estudio de las costas de Chile.
3. Analizar la relación entre la ubicación geográfica de las desembocaduras y su clasificación morfodinámica.

5. Metodología de investigación

Considerando la extensa amplitud de las costas chilenas la investigación requirió de una división de las zonas geográficas de estudio para obtención de datos, de esta forma se establecieron tres zonas:

- Zona Norte de Chile
- Zona Centro de Chile
- Zona Sur y Austral de Chile

Una vez establecidos estos límites se identificaron las desembocaduras y se agruparon respecto a su zona correspondiente.

Respecto a lo definido en el marco teórico para la utilización del método cuantitativo se realizan dos procedimientos para la obtención de datos y resultados.

5.1 Metodología de Predicción de morfología

Para el procedimiento de clasificación mediante predicción morfológica se deben determinar las condiciones de borde de la desembocadura definidas en el siguiente cuadro:

Tabla 1. Condiciones de Borde para Metodología de predicción.

Metodología de Predicción	Simbología	Nombre variable	unidad
Boundary Conditions (condiciones de borde)	waves/oleaje	T_p Período de onda H_s Altura de ola	s m
	Tides/marea	ϕ_0 Dirección media de oleaje α Amplitud de la marea en alta mar w Frecuencia angular de la marea	° m rad*s
	River/fluvial	Q_{river} Flujo medio de sedimentos fluviales	kg/s

Los datos relacionados con el oleaje y la marea son obtenidos desde Earth engine app (<https://jhnienhuis.users.earthengine.app/view/changing-shores>), utilizando el modelo WaveWatchIII (Chawla et al., 2013) para el clima de olas y el modelo TPX (Egbert y Erofeeva, 2002) para las propiedades de las mareas.

Como recomendación del método se indica que el flujo de sedimentos fluviales Q_{river} es obtenido del Repositorio Global Delta Change (<https://github.com/jhnienhuis/GlobalDeltaChange>), proporcionados por el modelo empírico WBMSed 2.0 desarrollado por Cohen et al., (2014).

Estos datos son procesados mediante las rutinas de MATLAB que fueron entregadas por los investigadores y se modificaron para adaptarlas a esta investigación, con el objetivo de obtener el flujo de sedimentos producido por el oleaje Q_{wave} y el flujo de sedimentos producido por la marea Q_{tide} en la desembocadura del río, mediante la aplicación desde la ecuación 1 a la ecuación 10 dentro de los códigos.

5.2 Metodología de observación de morfología

Este proceso, también conocido como la medición de la morfología del delta, se realiza con el apoyo del Google Earth Pro, herramienta recomendada por los investigadores debido a su utilidad en la digitalización de las dimensiones de las desembocaduras en estudio. Adicionalmente, permite observar imágenes satelitales actualizadas del estado de la desembocadura lo que entrega un primer acercamiento a la morfología y clasificación.

Al digitalizar las características morfológicas de las desembocaduras, estas se pueden cuantificar y procesarlas mediante rutinas de Matlab que fueron entregadas por los investigadores y se modificaron para adaptarlas a esta investigación, que al igual que en el proceso de predicción tienen como objetivo principal obtener el flujo de sedimentos producido por el oleaje Q_{wave} y el flujo de sedimentos producido por la marea Q_{tide} , pero esta vez utilizando desde la ecuación 11 a la ecuación 15 que se encuentran integradas dentro de los códigos.

Ambos procedimientos permitirán obtener sus respectivos flujos relativos, que al ingresarlos a la ecuación 11 permitirán determinar la precisión entre los resultados obtenidos entre el procedimiento de predicción y observación.

6. Identificación de desembocaduras

6.1 Zona Norte de Chile

El límite establecido para la Zona Norte de Chile se encuentra desde la Región de Arica y Parinacota hasta la Región de Coquimbo, en la cual se identifican un total de 7 desembocaduras que pueden ser analizadas mediante ambos procedimientos cuantitativos y son mencionadas en la Tabla 2:

Tabla 2. Desembocaduras Zona Norte de Chile.

N°	Delta
1	Loa
2	Salado
3	Copiapo
4	Huasco
5	Elqui
6	Limari
7	Choapa

6.2 Zona Centro de Chile

El límite establecido para la Zona Centro de Chile se encuentra desde la Región de Valparaíso hasta la Región de La Araucanía, en la cual se identifican un total de 8 desembocaduras que pueden ser analizadas mediante ambos procedimientos cuantitativos y son mencionadas en la Tabla 3:

Tabla 3. Desembocadura Zona Centro de Chile.

N°	Delta
1	Aconcagua
2	Maipo
3	Rapel
4	Mataquito
5	Maule
6	Pinotalca
7	Curanilahue
8	Chovellen

6.3 Zona Sur y Austral de Chile

El límite establecido para la Zona Sur y Austral de Chile se encuentra desde la Región de Los Ríos hasta la Región de Magallanes, en la cual se identifican un total de 27 desembocaduras que pueden ser analizadas mediante ambos procedimientos cuantitativos y son mencionadas en la Tabla 4:

Tabla 4. Desembocaduras en Zona Sur y Austral de Chile

N°	Delta
1	Itata
2	Pingüeral
3	Andalien
4	Biobio
5	Lebu
6	Paicavi
7	Tirúa
8	Imperial
9	Budi
10	Tolten
11	Queule
12	Mehuín
13	Valdivia
14	Bueno
15	Quilhue
16	Llesquehue
17	Llico
18	Mauñin
19	Puelo
20	Chepu
21	Yelcho
22	Cisnes
23	Aysén
24	Baker
25	Pascua
26	Serrano
27	Grande

7. Predicción de Morfología de las desembocaduras

Siguiendo el orden del diagrama descriptivo de la Imagen 2 para la metodología de predicción, el primer paso fue determinar el valor de las condiciones de borde de las desembocaduras analizadas. Para esto se obtuvieron los datos desde Google Earth Engine Apps como se muestra en la Imagen 5 y Imagen 6 en el caso de la desembocadura del Río Huasco, Región de Atacama.

En la Imagen 5 se pueden observar los datos locales de olas y mareas específicos de la desembocadura, datos que fueron exportados en formato .csv y el enlace a la serie temporal de WaveWatch para la ubicación seleccionada en formato .nc, para posteriormente realizar su lectura mediante los códigos de MATLAB.

En la Imagen 6 los datos entregados corresponden a el caudal descargado desde el cuerpo de agua $Q_{w,river}$ en [m³/s] y el flujo medio de sedimentos fluviales Q_{river} en [kg/s] ingresados directamente a la planilla de datos que se genera para adjuntar y procesar los resultados obtenidos de las rutinas de MATLAB.

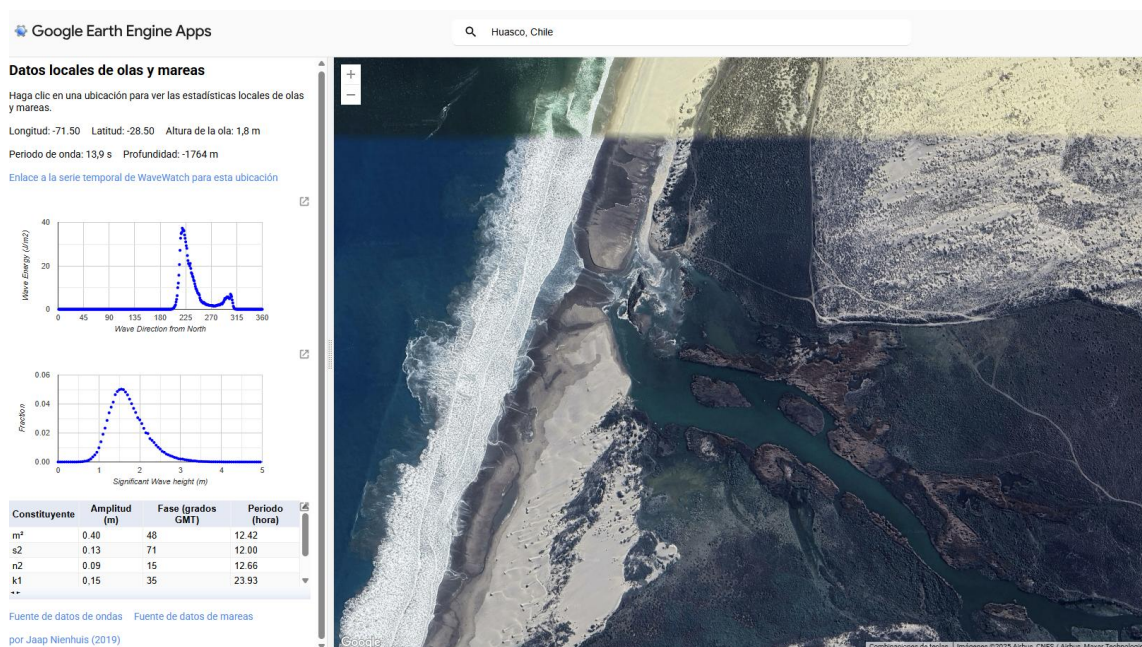


Imagen 5. Datos de marea (Amplitud, Fase y periodo) en el Río Huasco, Atacama.

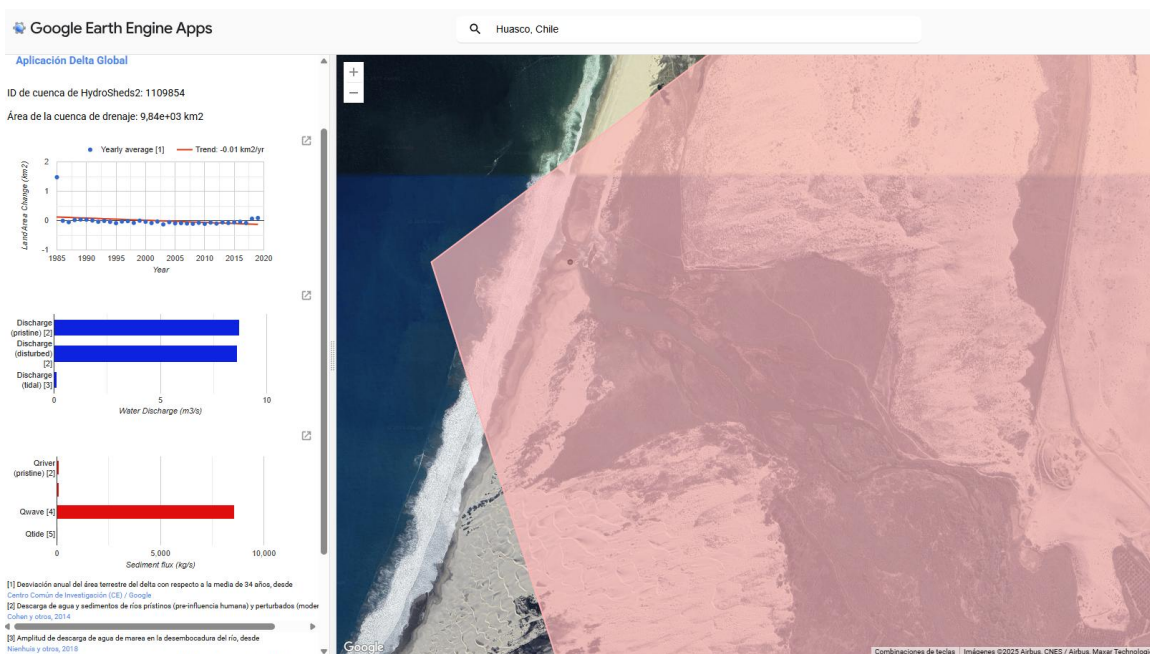


Imagen 6. Datos de flujo de sedimentos para el Río Huasco, Atacama.

8. Medición de la morfología de las desembocaduras

Como se mencionó en la Metodología de la investigación, este procedimiento se realizó mediante la digitalización de las dimensiones del delta utilizando imágenes satelitales. Para poder realizar este procedimiento se utilizó Google Earth Pro. Para cada una de las desembocaduras identificadas se creó un archivo kmz, con las siguientes variables y su respectivo formato, como se observa en la Imagen 7:

- Desembocadura_GenShoreline: Línea de costa.
- Desembocadura_Profile: Perfil de elevación (longitudinal) del río.
- Desembocadura_Rightflank: Flanco derecho.
- Desembocadura_LeftFlank: Flanco izquierdo.
- Desembocadura_Wm: Ancho aguas abajo del cauce (puede ser más de un canal distributivo).
- Desembocadura_Wu: Ancho aguas arriba del cauce.

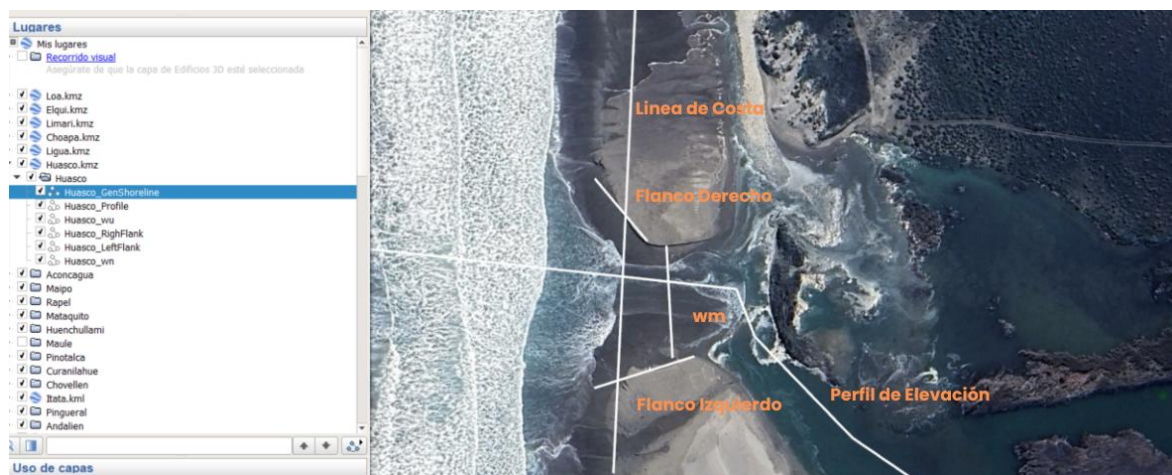


Imagen 7. Digitalización de las dimensiones de la Desembocadura del Río Huasco, Atacama.

9. Resultados

9.1 Análisis de datos

Finalizando ambos procesos de recopilación de información se obtiene un total de 42 desembocaduras identificadas que poseen los datos suficientes para poder aplicar el método cuantitativo y son las mencionadas en la Tabla 2, Tabla 3 y Tabla 4.

Es importante mencionar que algunas de las desembocaduras identificadas no contaban con registros del flujo medio de sedimentos fluviales Q_{River} [kg/s] y la descarga de agua desde el río hacia el mar $Q_{\text{w, River}}$ [m³/s], datos fundamentales para la aplicación del proceso de predicción de morfología del delta. Esta situación es recurrente en el extremo norte de Chile, por ejemplo, las primeras desembocaduras identificadas correspondientes a Lluta, Azapa y Camiña no poseen registros de datos, siendo la desembocadura número 5 correspondiente al Río Loa la primera en poseer datos, situación que se puede observar en la Imagen 8.

La falta de datos puede responder al hecho de que las desembocaduras ubicadas en el extremo norte del país no dirigen flujos importantes de aguas continentales y sedimentos hacia el océano, a excepción de eventos anuales de precipitación bastante escasos debido a su ubicación geográfica en el desierto más árido del mundo (Santibáñez et al., 2016).

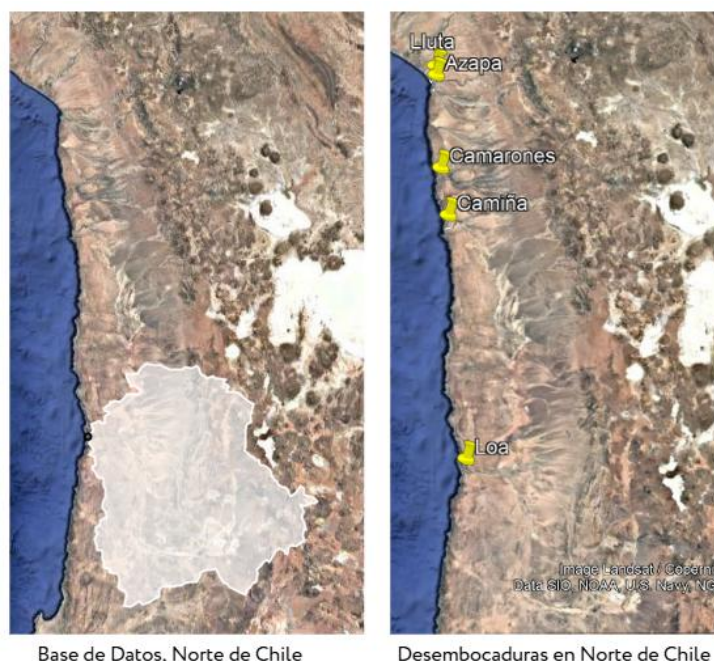


Imagen 8. Ubicación de las primeras cinco desembocaduras en el extremo norte de

Otro factor determinante para no poder clasificar la desembocadura mediante el método cuantitativo es el cierre completo del canal de salida hacia el mar por los sedimentos en el borde costero, dado que esto no permitiría digitalizar esta variable mediante el proceso de observación con imagen satelital propuesto por Paniagua-Arroyave y Nienhuis. Un ejemplo de esto es la desembocadura correspondiente al Río Camarones ubicado en la Región de Atacama y el Río Huenchullami ubicado en el Región del Maule, como se puede observar en la Imagen 9.



Imagen 9. Lado izquierdo imagen del Río Camarones y lado derecho imagen del Río Huenchullami.

9.2 Predicción de Morfología del Delta

Como resultado del proceso de predicción de morfología deltaica, se obtuvieron los Diagramas Ternarios de Galloway correspondientes a las tres zonas de estudio, en los cuales se representan las desembocaduras clasificadas según su dominancia, determinada a partir del flujo relativo r_x .

Además, cada gráfico incorpora un mapa de color en escala logarítmica, que permite interpretar la magnitud de los flujos de sedimentos [kg/s], siendo los colores más oscuros una representación de valores más altos de flujo. Complementariamente, el tamaño del vértice está escalado proporcionalmente a esta magnitud, reforzando visualmente la interpretación de los resultados.

I. Resultados Zona Norte de Chile – Predicción

Como se puede observar en el Gráfico 1 y en la Tabla 5, las desembocaduras en esta zona no poseen una fuerza dominante que predomine significativamente sobre las demás obteniendo resultados muy variados, los cuales posteriormente serán comparados con los resultados obtenidos del procedimiento de observación para identificar cuál de las dos clasificaciones es la más acertada y si ambas coinciden.

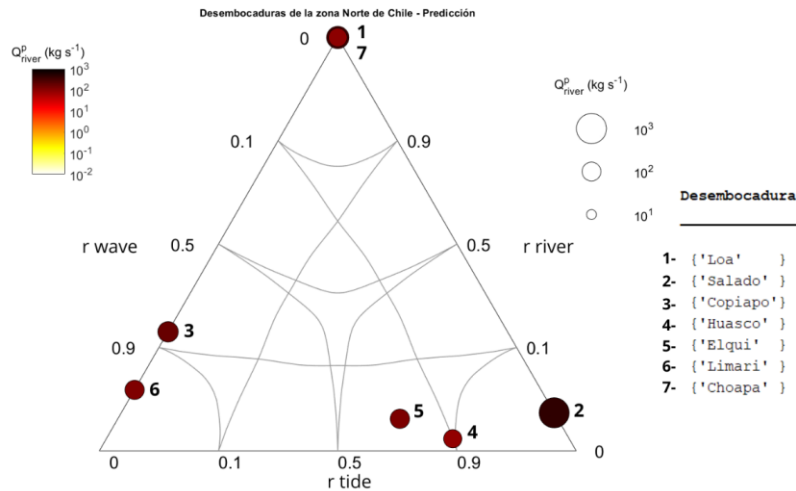


Gráfico 1. Diagrama Ternario de Galloway obtenido mediante proceso de Predicción para Zona Norte en estudio.

Tabla 5. Resultados proceso de Predicción Zona Norte.

N°	Delta	Dominancia de Predicción (1:River; 2: Wave; 3:Tide)
1	Loa	1
2	Salado	3
3	Copiapo	2
4	Huasco	3
5	Elqui	3
6	Limari	2
7	Choapa	1

II. Resultados Zona Centro de Chile- Predicción

Para los resultados mostrados en el Gráfico 2 y la Tabla 6 correspondientes a las desembocaduras de la zona Centro en estudio se puede observar como fuerza dominante la marea ya que predomina sobre las demás, debido a que 5 de las 8 desembocaduras presentan esta clasificación, observación que se debe comparar con los resultados obtenidos con el proceso de observación ya que si esta dominancia siguiese predominando, se podría concluir que la marea juega un papel fundamental en la formación morfodinámica de las desembocaduras presentes en la zona centro en estudio.

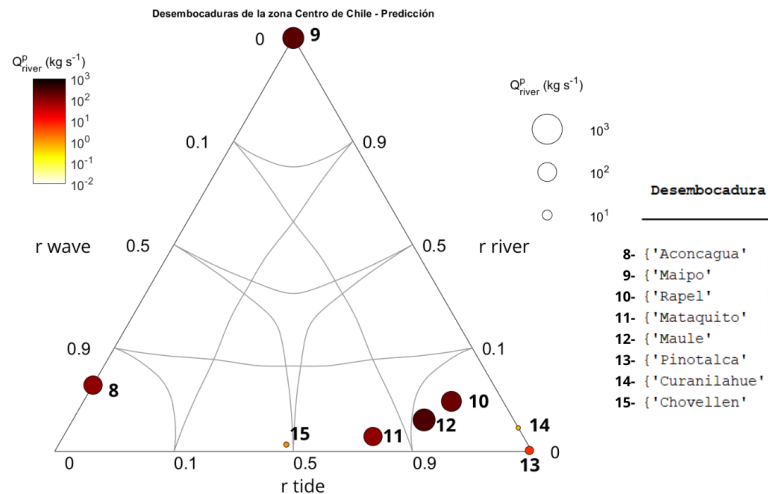


Gráfico 2. Diagrama Ternario de Galloway obtenido mediante proceso de Predicción para Zona Centro en estudio.

Tabla 6. Resultados proceso de Predicción Zona Centro

N°	Delta	Dominancia de Predicción (1:River; 2: Wave; 3:Tide)
8	Aconcagua	2
9	Maipo	1
10	Rapel	3
11	Mataquito	3
12	Maule	3
13	Pinotalca	3
14	Curanilahue	3
15	Chovellen	2

III. Resultados Zona Sur y Austral de Chile- Predicción

Para esta zona en particular fue posible identificar un mayor número de desembocaduras que en el resto del país, lo cual era esperado debido a la definición realizada en el apartado de zona de estudio ya que son regiones con clima lluvioso la mayor parte del año lo que genera mayor escurrimiento hacia los ríos y posteriormente su desembocadura en el mar.

Al observar los resultados obtenidos para la Zona Sur y Austral de Chile se puede determinar que mediante el procedimiento de clasificación morfodinámica de predicción la fuerza dominante corresponde al oleaje considerando que de un total de 27 desembocaduras clasificadas, 21 resultaron tener como fuerza predominante el oleaje, mientras que 5 de ellas se clasificaron con dominancia de marea y tan solo una con fuerza predominante de río, resultados que se pueden observar en el Gráfico 3 y en la Tabla 7.

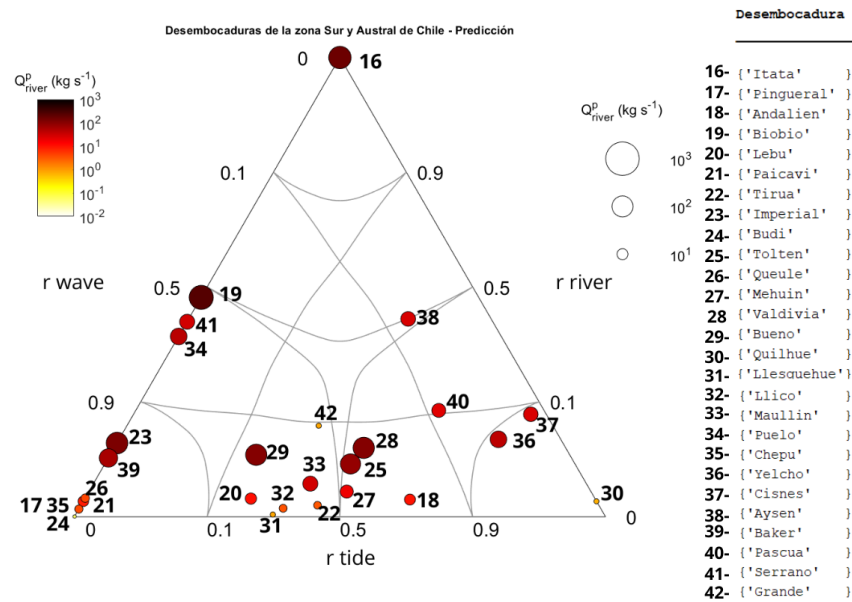


Gráfico 3. Diagrama Ternario de Galloway obtenido mediante proceso de Predicción para Zona Sur y Austral en estudio.

Tabla 7. Resultados proceso de Predicción Zona Sur y Austral.

N°	Delta	Dominancia de Predicción (1:River; 2: Wave; 3:Tide)
16	Itata	1
17	Pingueral	2
18	Andalien	3
19	Biobio	2
20	Lebu	2
21	Paicavi	2
22	Tirua	2
23	Imperial	2
24	Budi	2
25	Tolten	2
26	Queule	2
27	Mehuín	2
28	Valdivia	2
29	Bueno	2
30	Quilhue	3
31	Llesquehue	2
32	Llico	2
33	Mauillin	2
34	Puelo	2
35	Chepu	2
36	Yelcho	3
37	Cisnes	3
38	Aysen	2
39	Baker	2
40	Pascua	3
41	Serrano	2
42	Grande	2

9.3 Predicción Versus Observación de Morfología del Delta

Es muy relevante realizar una comparación entre ambos procesos de clasificación ya que los resultados obtenidos del proceso de observación buscan complementar y mejorar los resultados que se obtienen desde el proceso de dominancia de predicción debido a la digitalización de las características físicas de la desembocadura, lo que entrega una visión más amplia de todas las variables involucradas en la morfología del delta.

I. Resultados Zona Norte de Chile Predicción vs. Observación

En el caso de la zona Norte en estudio se obtuvieron los mismos resultados tanto para el proceso de dominancia de predicción como de observación, lo cual se ve reflejado en la incertidumbre calculada e_{ter} (Tabla 8), dado que se obtuvieron valores menores a 0.5 el límite inferior que determina una diferencia en la clasificación realizada por cada uno de los procesos. Resultados que también se pueden observar en el Gráfico 4, en el cual cada desembocadura fue posicionada en el diagrama ternario según su fuerza dominante, obteniendo una pequeña variación en la magnitud de los flujos relativos, pero determinando una misma clasificación.

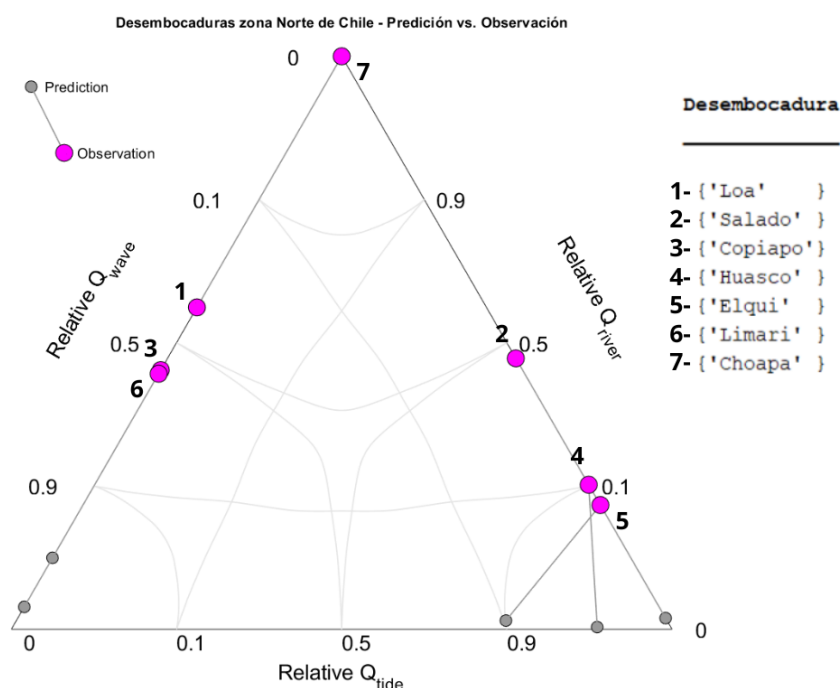


Gráfico 4. Diagrama Ternario de Galloway con resultado para Predicción y observación de Zona Norte en estudio.

Tabla 8. Resultados de ambos procesos para Zona Norte.

N°	Delta	Dominancia de Predicción (1:River; 2: Wave; 3:Tide)	Dominancia de Observación (1:River; 2: Wave; 3:Tide)	e_{ter}
1	Loa	1	1	0.333
2	Salado	3	3	0.427
3	Copiapo	2	2	0.342
4	Huasco	3	3	0.091
5	Elqui	3	3	0.089
6	Limari	2	2	0.348
7	Choapa	1	1	0.000

II. Resultados Zona Centro de Chile Predicción vs. Observación

Para la Zona Centro de Chile se obtuvieron los mismos resultados en el proceso de dominancia de predicción y observación para 7 de las 8 desembocaduras, obteniendo solo una clasificación diferente en la última desembocadura clasificada, lo que se ve reflejado en la incertidumbre calculada e_{ter} (Tabla 9). Dicha diferencia de clasificación también es posible de observar en el Gráfico 5, dado que el resultado del proceso de Dominancia de Predicción cambia la posición del vértice de la desembocadura número 15 desde el “área” del flujo relativo dominante de marea hacia el flujo relativo dominante de oleaje.

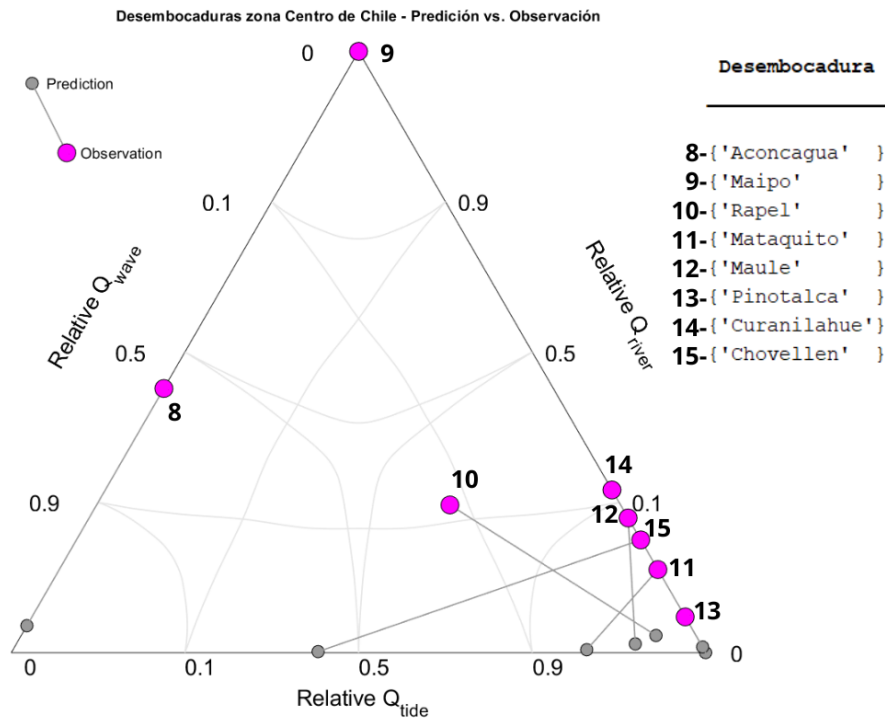


Gráfico 5. Diagrama Ternario de Galloway con resultado para Predicción y observación de Zona Centro en estudio.

Tabla 9. Resultados de ambos procesos de Observación Zona Centro.

N°	Delta	Dominancia de Predicción (1:River; 2: Wave; 3:Tide)	Dominancia de Observación (1:River; 2: Wave; 3:Tide)	e_{ter}
8	Aconcagua	2	2	0.329
9	Maipo	1	1	0.000
10	Rapel	3	3	0.204
11	Mataquito	3	3	0.044
12	Maule	3	3	0.073
13	Pinotalca	3	3	0.010
14	Curanilahue	3	3	0.112
15	Chovellen	2	3	0.630

III. Resultados Zona Sur y Austral de Chile Predicción vs. Observación

la zona Sur y Austral de Chile constituye el caso de estudio en donde ambos métodos presentan la mayor diferencia en cuanto a resultados de clasificación. Se obtuvo un total de 11 desembocaduras con igual clasificación utilizando ambos métodos, mientras que los 16 restantes presentan una diferencia en su tipo de clasificación según el proceso utilizado, lo cual se refleja en los altos valores de incertidumbres obtenidos, incluso en algunos casos obteniendo valores iguales a 1.

Con los datos entregados en la Tabla 10 se puede observar que con el método de predicción la fuerza dominante es el oleaje, mientras que con el método de observación la fuerza dominante es la marea, resultados comparados en el Diagrama Ternario de Galloway del Gráfico 6.

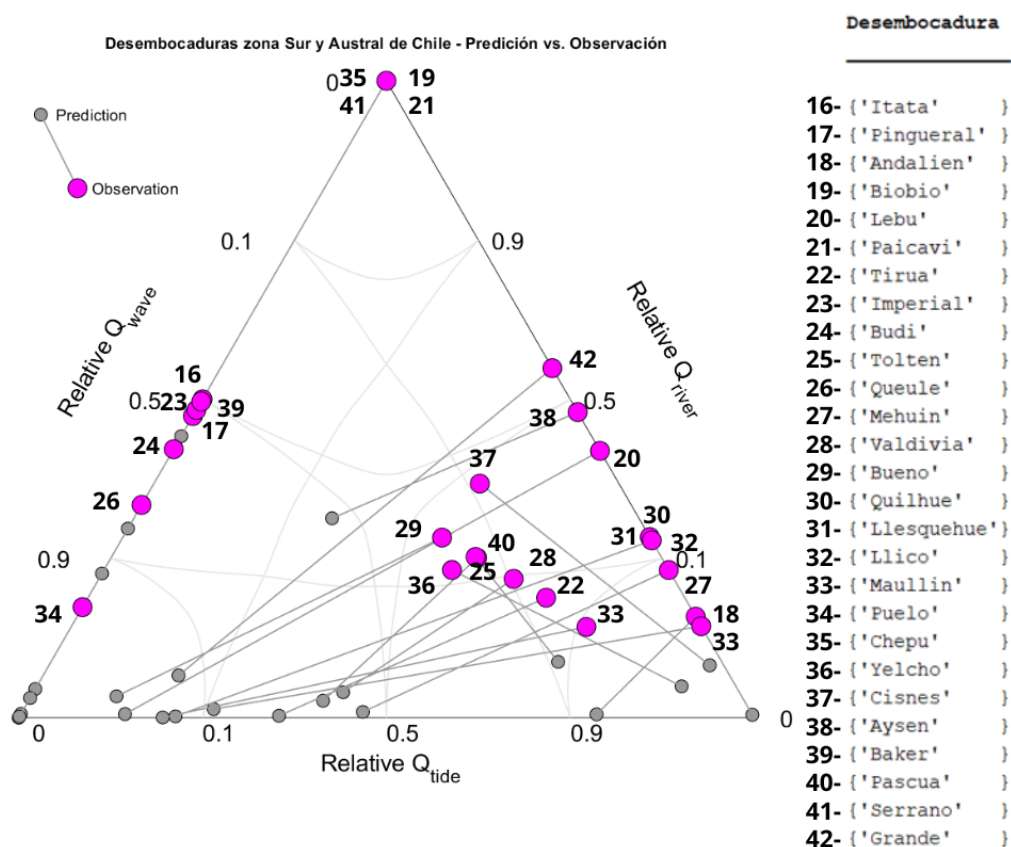


Gráfico 6 Diagrama Ternario de Galloway con resultado para Predicción y observación de Zona Sur y Austral en estudio.

Tabla 10. Resultados de ambos procesos de Observación Zona Sur y Austral de Chile.

N°	Delta	Dominancia de Predicción (1:River; 2: Wave; 3:Tide)	Dominancia de Observación (1:River; 2: Wave; 3:Tide)	e _{ter}
16	Itata	1	1	0.500
17	Pingüeral	2	2	0.432
18	Andalien	3	3	0.066
19	Biobio	2	1	0.656
20	Lebu	2	3	0.857
21	Paicavi	2	1	1.000
22	Tirúa	2	3	0.718
23	Imperial	2	2	0.450
24	Budi	2	2	0.290
25	Tolten	2	3	0.549
26	Queule	2	2	0.158
27	Mehuín	2	3	0.546
28	Valdivia	2	3	0.527
29	Bueno	2	3	0.714
30	Quilhue	3	3	0.121
31	Llesquehue	2	3	0.865
32	Llico	2	3	0.871
33	Mauillin	2	3	0.874
34	Puelo	2	2	0.032
35	Chepu	2	1	1.000
36	Yelcho	3	3	0.242
37	Cisnes	3	3	0.368
38	Aysen	2	3	0.518
39	Baker	2	2	0.487
40	Pascua	3	3	0.139
41	Serrano	2	1	0.869
42	Grande	2	1	0.815

IV. Incertidumbre de Predicción versus Observación

Finalmente resumiendo los resultados de las incertidumbres obtenidas mediante la comparación de los modelos de predicción y observación se obtiene el Gráfico 7, en el cual se puede distinguir que para este análisis las desembocaduras que tuvieron menor error de determinación de dominancia son aquellas en las cuales predomina la fuerza de las olas, mientras que las desembocaduras número 21 y 35 ambas clasificadas con fuerza predominante fluvial, obtuvieron el valor más alto de error.

Al realizar el análisis de Norte a Sur se puede decir que los mayores valores de incertidumbre se encuentran en la Zona Sur de estudio, específicamente lado derecho del gráfico.

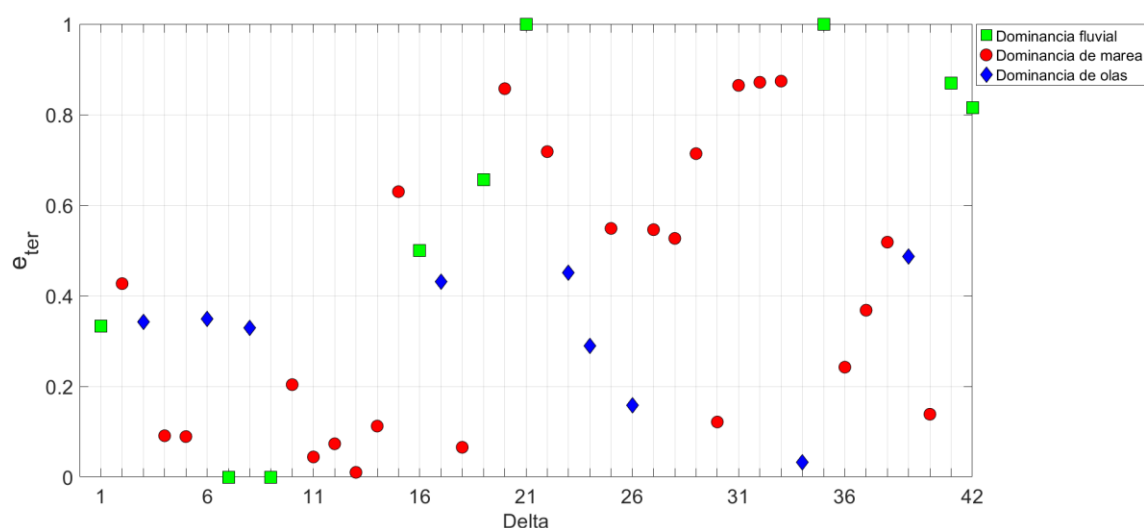


Gráfico 7. Valor de incertidumbre para comparación de procesos de predicción versus observación.

10. Conclusiones y Comentarios

Al iniciar con la identificación de las desembocaduras y recopilación de datos uno de los primeros criterios de los cuales se desconocía su viabilidad para aplicar el método era el valor límite del caudal para el cual se obtendrían resultados concluyentes, estableciendo una interrogante respecto a la posibilidad de poder clasificar la desembocadura a pesar de poseer un flujo en m³/s pequeño en comparación con otros cauces. Esta interrogante pudo ser resuelta mediante la obtención de los resultados de clasificación, ya que no existe una relación entre un valor pequeño de caudal y un alto valor de incertidumbre entre ambos métodos, lo cual queda demostrado con las desembocaduras presentes en la zona norte del país, las cuales a pesar de poseer caudales menores a los 11 m³/s no representaron un problema a la hora de realizar su clasificación mediante el método de predicción y además se obtuvieron los mismos resultados aplicando el método de observación. A su vez valores altos de caudal con secciones de desembocaduras bien definidas que permitieran digitalizar sin problemas sus propiedades físicas, no aseguraron que ambos métodos determinaran a la misma fuerza como proceso dominante, esto se ve reflejado en los resultados obtenidos en la zona Sur y Austral en estudio.

Respecto a la viabilidad de la aplicación del método cuantitativo propuesto por Paniagua-Arroyave & Nienhuis (2024), se puede concluir que es posible realizar la clasificación para la mayoría de las desembocaduras existentes en el país, existiendo solo un pequeño grupo de desembocaduras que quedan excluidas de este método, teniendo como limitación la falta de datos en línea para aplicar el modelo.

Analizando los resultados numéricos para la dominancia por zonas de estudio se puede concluir que en la Zona Norte entre las regiones de Arica y Coquimbo no se observa una fuerza dominante, mientras que en la Zona Centro entre las regiones de Valparaíso a la Araucanía se puede observar una clara tendencia de dominancia de la marea obteniendo este resultado para el 63% de las desembocaduras clasificadas. Para los resultados obtenidos en la zona Sur y Austral entre la región de Los Ríos y Magallanes, se puede evidenciar una diferencia al intentar determinar si la desembocadura es dominada por el oleaje o la marea, ya que es en estos casos en los cuales se observan grandes valores de incertidumbre entre ambos métodos. Utilizando el método de predicción se concluye que el 78% de las desembocaduras poseen como fuerza dominante el oleaje mientras que al utilizar el método de observación se obtiene que el 56% de las desembocaduras poseen como proceso dominante la marea y solo un 22% el oleaje. Si a este análisis se incluye la clasificación cualitativa se puede mencionar que para la Zona Norte y Centro se obtuvieron resultados esperados de clasificación para las desembocaduras mientras que para la Zona Sur y Austral en estudio se puede suponer una diferencia entre los resultados de los métodos debido a que las desembocaduras no poseen solo una fuerza dominante, siendo común las clasificaciones de río-oleaje, río-marea y oleaje-mareas, características observables en las imágenes satelitales, en las cuales la morfología del delta demuestra la influencia de más de una fuerza.

Concluyendo en base a lo mencionado anteriormente se puede indicar que el modelo se puede adaptar a las desembocaduras de nuestro país ubicadas desde la región de Arica hasta la Región de la Araucanía, pero entre las regiones de Los Ríos y Magallanes es necesario desarrollar el modelo respecto a estas necesidades de clasificación, para que de esta manera se permita determinar dos fuerzas dominantes en las desembocaduras.

Por último, Recordando que las desembocaduras son ambientes altamente dinámicos, se debe tener en consideración que la digitalización de las características físicas de las desembocaduras representan un instante en el tiempo en el cual se posee el registro satelital del cuerpo de agua, lo cual puede variar a lo largo del tiempo, tanto por estacionalidad generando un cambio en un periodo de 12 meses, como por cambio climático generando cambios que se visualizan a lo largo de los años, por lo tanto como un punto de mejora para investigaciones futuras la clasificación de una desembocadura no debería considerar solo los registros actuales de bases de datos disponibles si no que debería responder a datos históricos e imágenes satelitales de diferentes épocas para lograr comprender de una forma más completa el comportamiento de la desembocadura y poder generar una caracterización y clasificación de variables influyentes en la morfología, permitiendo entender si estamos frente a procesos morfodinámicos cíclicos o únicos a lo largo del tiempo, lo que posibilita predecir escenarios futuros.

11. Referencias

- Broaddus, C. M., Vulis, L. M., Nienhuis, J. H., Tejedor, A., Brown, J., Foufoula-Georgiou, E., & Edmonds, D. A. (2022). First-Order River Delta Morphology Is Explained by the Sediment Flux Balance From Rivers, Waves, and Tides. *Geophysical Research Letters*, 49(22). <https://doi.org/10.1029/2022GL100355>
- Caldwell, R. L., & Edmonds, D. A. (2014). The effects of sediment properties on deltaic processes and morphologies: A numerical modeling study. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 119(5), 961–982. <https://doi.org/10.1002/2013JF002965>
- Chawla, A., Spindler, D. M., & Tolman, H. L. (2013). Validation of a thirty year wave hindcast using the Climate Forecast System Reanalysis winds. *Ocean Modelling*, 70, 189–206. <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2012.07.005>
- Cohen, S., Kettner, A. J., & Syvitski, J. (2014). Global suspended sediment and water discharge dynamics between 1960 and 2010: Continental trends and intra-basin sensitivity. *Global and Planetary Change*, 115, 44–58. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2014.01.011>
- Coleman, J. M., & Wright, L. D. (1975). Modern River Deltas: Variability of Processes and Sand Bodies. In M. lou Broussard (Ed.), *Deltas, Models for Exploration* (pp. 99–150). Houston, TX, USA: Houston Geological Society.
- Correa Arango, I. D., Restrepo Angel, J. Dario., & Aristizábal R., O. C. (2002). *Geología y oceanografía del Delta del Río San Juan : Litoral Pacífico Colombiano*. Fondo Editorial Universidad EAFIT.
- Egbert, G. D., & Erofeeva, S. Y. (2002). Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 19(2), 183–204. [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(2002\)019<0183:EIMOB>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(2002)019<0183:EIMOB>2.0.CO;2)
- Galloway, W. E. (1975). *Process framework for describing the morphologic and stratigraphic evolution of deltaic depositional system*, in Broussard. <https://www.researchgate.net/publication/287828682>
- Greze, P. W., Aguirre, C., Farías, L., Contreras-López, M., & Masotti, Í. (2020). Evidence of climate-driven changes on atmospheric, hydrological, and oceanographic variables along the Chilean coastal zone. *Climatic Change*, 163(2), 633–652. <https://doi.org/10.1007/s10584-020-02805-3>
- Lisbet, A., Cano, C., De Grado Asesor, T., Felipe, J., & Arroyave, P. (2023). *Clasificación de las Desembocaduras Fluviales del Caribe Colombiano usando El Diagrama de Galloway Cuantitativo*.
- McSweeney, S. L., Kennedy, D. M., Rutherford, I. D., & Stout, J. C. (2017). Intermittently Closed/Open Lakes and Lagoons: Their global distribution and boundary conditions. *Geomorphology*, 292, 142–152. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.04.022>
- Nienhuis, J. H., Ashton, A. D., Edmonds, D. A., Hoitink, A. J. F., Kettner, A. J., Rowland, J. C., & Törnqvist, T. E. (2020). Global-scale human impact on delta morphology has led to net land area gain. *Nature*, 577(7791), 514–518. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1905-9>
- Paniagua-Arroyave, J. F., & Nienhuis, J. H. (2022). *Global River Delta Morphology: Predictions Versus Observations within the Galloway Ternary Diagram*. <https://doi.org/10.22541/essoar.167205899.99969764/v1>
- Broaddus, C. M., Vulis, L. M., Nienhuis, J. H., Tejedor, A., Brown, J., Foufoula-Georgiou, E., & Edmonds, D. A. (2022). First-Order River Delta Morphology Is Explained by the Sediment Flux Balance From Rivers, Waves, and Tides. *Geophysical Research Letters*, 49(22). <https://doi.org/10.1029/2022GL100355>
- Felipe Paniagua-Arroyave, J., & Nienhuis, J. (2024). *The Quantified Galloway Ternary Diagram of Delta Morphology*. <https://doi.org/10.22541/essoar.172046797.72145471/v1>
- Morales Gamboa, E., Winckler Grez, P., & Herrera Araya, M. (2019). *Costas de Chile. Medio natural, Cambio climático, Ingeniería oceánica, Gestión costera*.
- Nienhuis, J. H., Hoitink, A. J. F. T., & Törnqvist, T. E. (2018). Future Change to Tide-Influenced Deltas. *Geophysical Research Letters*, 45(8), 3499–3507. <https://doi.org/10.1029/2018GL077638>

- Santibáñez, F. Q., Apey, A., Daniel Barrera, G., & Carbonell Piccardo Directora Nacional, C. (2016). *Estudio El cambio climático y los recursos hídricos de Chile - La transición hacia la gestión del agua en los nuevos escenarios climáticos*. www.odepa.gob.cl
- Santibáñez, F., Roa, P., & Santibáñez, P. (2016). *LIBRO BIODIVERSIDAD DE CHILE CAPITULO I: MEDIO FÍSICO AUTORES*.
- Uribe M, C., Cabrera R, De la Fuente A, & Paneque M. (2012). *Atlas Bioclimático de Chile*.
- Stuardo, J., & Claudio Valdovinos, Y. (1989). Estuarios y lagunas costeras: ecosistemas importantes del Chile central. In *Amb. y Des* (Vol. 1).
- Torres-Bejarano, F., González-Martínez, J., Naranjo-Saleme, M., & Martínez-Cantero, J. (2022). Sediment transport modeling in the Sinú river Delta, Colombia. *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental*, 38(Special issue 2), 25–40. <https://doi.org/10.20937/RICA.54337>
- Walling, D. E., & Fang, D. (2003). Recent trends in the suspended sediment loads of the world's rivers. *Global and Planetary Change*, 39(1–2).[https://doi.org/10.1016/S0921-8181\(03\)00020-1](https://doi.org/10.1016/S0921-8181(03)00020-1)